

ПЕРВЫЕ ШАГИ К КАРТИРОВАНИЮ ЭКЗОПЛАНЕТ: МОДЕЛИРОВАНИЕ ВТОРИЧНЫХ ЗАТМЕНИЙ И ПОИСК НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ИНФРАКРАСНЫХ ПРОФИЛЕЙ ЯРКОСТИ

А. А. Федотов¹, Г. М. Карелин²

¹Санкт-Петербургский государственный университет,

²Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН

С целью обнаружения неоднородностей собственного излучения экзопланеты HD209458b по наблюдениям космического телескопа Spitzer проведены обработка и моделирование кривых блеска вторичных транзитов (затмений). Работа является основой для последующего картирования распределения температуры на дневной стороне этой внесолнечной планеты. Неравномерность яркости вызвана звездно-планетными взаимодействиями, а также климатическими механизмами. Глубина затмения составила $0.101 \pm 0.009\%$ от общего блеска системы и согласуется с результатами других работ.

FIRST STEPS TO MAPPING OF EXOPLANETS: MODELING SECONDARY ECLIPSES AND SEARCH INHOMOGENEITIES IN THE INFRARED BRIGHTNESS PROFILES

A. A. Fedotov¹, G. M. Karelin²

¹*St. Petersburg State University, the Department of Celestial Mechanics,* ²*The Central
Astronomical Observatory of the Russian Academy of Sciences at Pulkovo*

To detect inhomogeneities in the thermal radiation of exoplanet HD209458b, based on observations of the Spitzer space telescope processing and modeling of the light curves of secondary transits (eclipses) were carried out. Current work is the basis for the mapping of the temperature distribution on the dayside of the exoplanet. Tidal and electromagnetic star-planet interactions, together with climate effects, lead to nonuniform heating of the surface. We obtained that the depth of the eclipse was $0.101 \pm 0.009\%$ of the total flux of the system and is consistent with the results of other works.

Введение

На сегодняшний день научному сообществу известно более 3300 транзитных экзопланет. Геометрия орбит большинства из них определяет наличие не только первичного транзита (прохождения), но и вторичного затмения, во время которого экзопланета проходит за звездой. Затмения позволяют уточнять элементы орбит уже обнаруженных внесолнечных планет и искать новые, — при определенных параметрах орбиты возможно наличие затмения при отсутствии транзита. Однако текущая фотометрическая точность делает детектирование затмений сложной задачей. Такой класс экзопланет, как горячие юпитеры, характеризуется большими размерами и высокой температурой, а следовательно, высокой светимостью. Поэтому подобные экзопланеты являются удобными кандидатами для наблюдения не только прохождений, но и затмений, проявляющихся как падения блеска. Заход планеты за звезду позволяет провести сканирование распределения яркости по ее диску для последующего построения карты. Нахождение планеты в приливном захвате со

звездой приводит к значительному нагреву ее дневной стороны. Из-за атмосферных механизмов наиболее нагретая область планеты (горячее пятно) смещается от направления на звезду из центра планеты. Основной задачей данного этапа работы является моделирование вторичного затмения с целью обнаружения смещения горячего пятна. В дальнейшем планируется построить карту температур на основе полученной информации.

Обработка наблюдательных данных

Поскольку температуры горячих юпитеров ниже звездных (хотя и могут превышать 1000 K), для проведения исследования был выбран инфракрасный диапазон, на который приходится максимум излучения подобных температур, а именно данные в полосе 3.6 мкм инструмента IRAC космического телескопа Spitzer. Кроме того, в связи с низкой отражательной способностью горячих юпитеров в этом диапазоне рассматривалось только собственное излучение нагретой планеты. Предобработанные данные (BCD; Basic Calibrated Data) телескопа Spitzer находятся в открытом доступе (<https://sha.ipac.caltech.edu/applications/Spitzer/SHA/>) и включают в себя учет различных инструментальных эффектов, кадров темнового шума и плоского поля. Также данные уже привязаны к небесным координатам и значения на них переведены в единицы MJy/cr.

В качестве объекта исследования была выбрана экзопланета HD209458b, так как ее орбита является почти круговой, что упрощает моделирование. Для нее имеется 14 наблюдений затмений в полосе 3.6 мкм. В дальнейшем планируется рассмотреть другие системы.

Обработка данных производилась при помощи пакетов `astropy` [1] и `photutils` [2]. Для получения кривых блеска проводилась апертурная фотометрия. Основной принцип состоит в суммировании значений интенсивности пикселей внутри некоторой области. Часто область ограничивается окружностью из пикселей. Размер апертуры берется таким, чтобы уменьшить влияние ближайших деталей изображения и наиболее точно измерить яркость объекта наблюдения. Не весь свет объекта попадает в апертуру, так как профиль распределения яркости по кадру имеет протяженные крылья.

В имеющихся данных на кадре находится только одна яркая звезда. Поэтому делается предположение, что яркость звезды постоянна, а изменение потока связано лишь с затмением экзопланеты. Важно изменение яркости внутри только одного затмения. Предполагается, что функция рассеяния точки в пределах одной серии наблюдений неизменна, что для космического телескопа выглядит более правдоподобно, чем для наземного. Из полученного потока вычитается фон. Для него выбираются пиксели в некотором кольце вокруг звезды. Далее находится медиана значений пикселей в этой области и вычитается из апертуры с домножением на ее площадь.

Моделирование и используемые приближения

В основе использованной модели затмения лежит приближение равномерно светящегося диска из работы [3]. Модель описывает излучение объекта с учетом его частичного или полного закрытия от наблюдателя другим объектом. Яркость видимой части экзопланеты в этом случае пропорциональна площади диска, поток от которой не перекрыт.

Мы исходим из предположения, что во время затмения планета движется равномерно по прямой линии с некоторым прицельным параметром относительно центра диска звезды. Момент центра вторичного затмения, прицельный параметр, скорость движения планеты и отношения радиусов планеты и звезды рассчитывались при помощи данных из статьи [4].

Полная светимость системы складывалась из светимости экзопланеты и звезды. Наблюдаемая кривая блеска зависела от короткопериодической переменности и активности

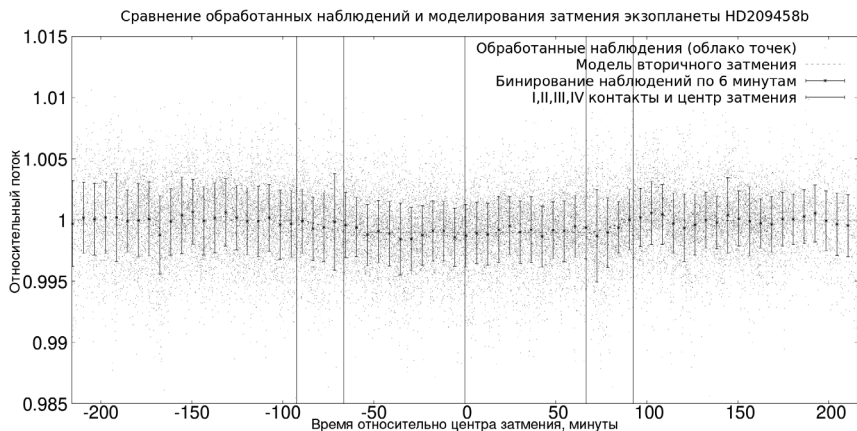
звезды. Для снижения их влияния временной ряд кривой блеска, включающий момент затмения, но существенно его превышающий, аппроксимируется многочленом пятой степени. После вычитания многочлена полученный временной ряд содержит шум звезды, шум приемника и искомый сигнал — падение блеска из-за затмения.

В связи с тем что поток от звезды в полосе 3.6 мкм на три порядка больше, чем от планеты [5], отношение потока планеты к потоку звезды можно заменить на отношение потока планеты к суммарному потоку.

Определение параметров модели проводится с использованием метода наименьших квадратов. Коэффициенты многочленов, моделирующих звездную активность, подбирались отдельно для каждого затмения, а доля потока от планеты в общем потоке и смещение центра затмения — относительно расчетного для всех. Решение этой задачи происходило по аналогии с работой [6]. Для реализации метода наименьших квадратов использовалась функция `optimize.curve_fit` из пакета `scipy` [7]. Периодическая компонента шума была убрана при помощи преобразования Фурье, оставшийся шум дополнительно сглажен бинированием.

Разработанный код, а также подробное описание алгоритмов моделирования и подбора параметров находятся в свободном доступе: <https://github.com/dosidicus-deprimas/HD209458b>

Закключение



Графические результаты моделирования

Проведена фотометрия для 14 затмений HD209458b. По полученным данным была построена модель, включающая в себя моделирование всех обработанных наблюдений. В результате были получены смещение времени центра затмения (1.64 ± 1.29 мин) и отношение светимостей планеты и звезды ($0.101 \pm 0.009\%$). Погрешности оценок, вероятно, занижены, так как при их вычислении предполагалось, что шум является белым. Отношение яркостей согласуется с данными, полученными в статье [5].

В конечном итоге было проведено бинирование невязок модели. Оно показало, что существующих данных недостаточно для выявления использованным методом значительных

неоднородностей при затмении HD209458b. Зафиксированное отклонение момента центра затмения находится в пределах погрешности и может быть объяснено орбитальными характеристиками планеты. Данные других работ [8] свидетельствуют о том, что неоднородность может быть слишком мала, чтобы ее надежно зафиксировать при полученных погрешностях. Для продолжения работы и поиска неоднородностей во время захода планеты за диск звезды и выхода из-за него необходимы тщательное моделирование небелого (цветного) шума и дополнительные наблюдения.

Библиографические ссылки

- [1] *Astropy Collaboration, Robitaille T. P., Tollerud E. J. et al.* Astropy: A Community Python Package for Astronomy. — Vol. 558. — P. A33.
- [2] *Bradley Larry, Sipocz Brigitta, Robitaille Thomas et al.* astropy/photutils: v0.6. — 2019.
- [3] *Baluev R. V., Shaidulin Vakhit Sh.* Analytic models of the Rossiter-McLaughlin effect for arbitrary eclipser/star size ratios and arbitrary multiline stellar spectra // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2015. — Vol. 454, № 4. — P. 4379–4399. 1506.01874.
- [4] *Bonomo A. S., Desidera S., Benatti S. et al.* The GAPS Programme with HARPS-N at TNG . XIV. Investigating giant planet migration history via improved eccentricity and mass determination for 231 transiting planets // Astron. Astrophys. — 2017. — Vol. 602. — P. A107. 1704.00373.
- [5] *Evans Thomas M., Aigrain Suzanne, Gibson Neale et al.* A uniform analysis of HD 209458b Spitzer/IRAC light curves with Gaussian process models // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2015. — Vol. 451, № 1. — P. 680–694. 1504.05942.
- [6] *Baluev R. V., Sokov E. N., Hoyer S. et al.* WASP-4 transit timing variation from a comprehensive set of 129 transits // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2020. 2004.09109.
- [7] *Virtanen Pauli, Gommers Ralf, Oliphant Travis E. et al.* SciPy 1.0: Fundamental Algorithms for Scientific Computing in Python // Nature Methods. — 2020. — Vol. 17. — P. 261–272.
- [8] *Burrows A., Rauscher E., Spiegel D. S., Menou K.* Photometric and Spectral Signatures of Three-dimensional Models of Transiting Giant Exoplanets // Astrophys. J. — 2010. — Vol. 719, № 1. — P. 341–350. 1005.0346.